

Sustentabilidad minera

Leandro Herrera, Ph.D.

Curso IQ5423-1 Estabilidad Química de Depósitos de Relaves

Departamento de Ingeniería Química, Biotecnología y Materiales

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas

Universidad de Chile

¿Minería Sustentable?

- Naturalmente, es imposible, ya que los ecosistemas no reponen los minerales, de los cuales el planeta tiene una dosis fija
- En Chile debemos entender que el léxico común está asociado a la publicidad más que a la cultura
- Con todo, es cierto que se puede hacer minería “*mas sustentable*”

Diversas minerías: ¡no sustentables!

Producción de Metales *puros*

Cobre	Hierro	Molibdeno
Zinc	Manganeso	Plomo
Plata	Oro	

o exportación directa de *concentrados* de metal

Especies no metálicas puras

Carbonato de Calcio	Cloruro de sodio
Azufres	Pumacita
Nitratos	Otros (Carbón)

Minería en Chile

- De gran impacto económico
- De gran volumen procesado
- En cobre, proveedores del 60% del cobre mundial (la mitad es de Codelco)
- Economía abierta (orientada a exportación)
- Minería constituye el 35% del PIB (fuerte dependencia con el precio internacional)
- Gran velocidad de agotamiento de recursos no renovables

Procesos mineros

- Comienza con la prospección, termina en venta... ¿debiera ser más amplio?
- Explotación de yacimiento
- Transporte (estéril o portador)
- Tamaño del mineral (conminución mecánica)
- Purificación
 - Pirometalurgia
 - Hidrometalurgia

Minería de cobre

- Ley de cobre: contenido porcentual, en peso
- Ley de corte: contenido de cobre elemental que permite, exactamente, la explotación económica de un yacimiento
- Minerales: especies molecularmente complejas que contienen el metal de interés (mezclas del cobre con oxígeno, hierro, azufre, etc.)
- Especie portadora: la molécula que tiene cobre en su estructura molecular

Impacto de la ganga

- Si se explota un yacimiento de 1% de cobre, por cada tonelada de cobre producido se deben disponer “en alguna parte” y “en alguna forma”, 99 toneladas de ganga
- La ganga no es, exactamente, estéril; su contenido de cobre está por debajo de la ley de corte solamente
- La ganga se dispone como botaderos o como relave de molienda y flotación

Mina Chuquicamata
vista desde GoogleEarth

Sólo una pequeña
cantidad de todo este
rajo era cobre
¿Qué hacemos con
el resto?



© 2009 Google
© 2009 DMapas
Image © 2009 DigitalGlobe
© 2009 Europa Technologies



Mina El Teniente. No vemos ningún Rajo. Mina Subterránea
¿Dónde van los sólidos sobrantes?

Canaleta de relaves El Teniente



Canaleta que recorre desde la mina hasta el Tranque Carén.
La distancia lineal es de unos 80 Km. Es una gran obra que
debe caer a la pendiente adecuada a lo largo de todo su camino

Primer impacto ambiental; ganga

- La magnitud del problema indica que debe tener un impacto ambiental fuerte
- Todo depende de la sociedad: ¿Qué se puede botar? ¿Qué regulaciones se deben acoger? ¿Es importante dejar 3 millones de toneladas de sólidos abandonados? ¿Importa la composición de los sólidos abandonados?
- ¿Importa el procesos? SI

Primeras etapas mineras

- La minería del yacimiento, mediante explosivos, genera polvo y ruido
- En rajo abierto, se remueve material para llegar al sector con ley superior al corte; ese material se abandona en “botaderos de estéril”
- Se usan camiones y palas a petróleo
- Conclusión:
 - Alto tonelaje de material con poco metal se remueve, usando explosivos y petróleo, y se abandona para llegar al mineral que se debe explotar

- Donde, cómo y qué se produce es “la” clave para decidir qué hacer con los residuos

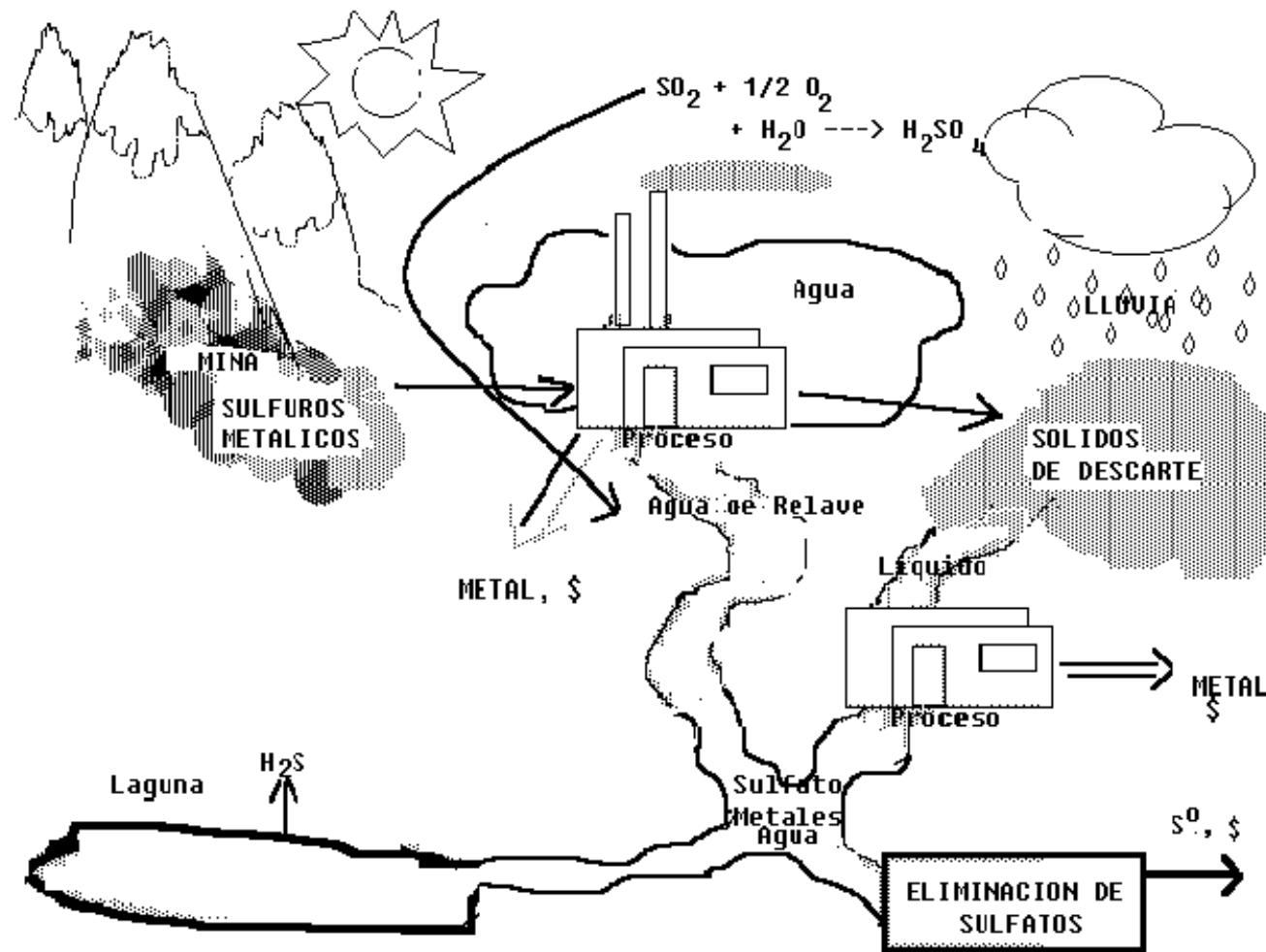


Figura 1: Boceto simplificado del flujo de materiales en pirometalurgia

Piro metalurgia (fundición)

- Procesamos minerales sulfurados de cobre
- Contienen otros metales (Hierro, Molibdeno, Manganeso, Arsénico, etc.)
- La ruta de producción típica es pirometalúrgica, altamente oxidativa, de modo que se oxidan los sulfuros.
- El efecto del proceso no es, entonces, sólo purificar el cobre del mineral

Salidas de un proceso piro metalúrgico

- El metal de interés (Cobre, Molibdeno, etc.)
- Escoria fundida (óxidos y sulfuros de hierro, ppal%)
- Mineral de baja ley (grueso)
- Sólidos descartados (finos, en el relave)
- Anhídrido sulfuroso en fase gaseosa (usualmente se lleva a ácido sulfúrico)
- Arsénico (y otros metales) en fase gaseosa y líquida (que pueden ser retirados en las plantas de producción de ácido)
- Aguas de transporte (relave)
- Metales no recuperados (molibdeno, plomo, arsénico, hierro, etc.)

El Agua

- Grandes flujos; utilizada para transporte
- La vida es acuosa; especies disueltas son peligrosas
- Escasea en el Norte de Chile
- Sólidos abandonados que se mojan, suelen producir “Drenaje Ácido de Mina” (AMD)
- Cuando llueve en este tipo de ambiente, las lluvias son ácidas (absorción SO_x)
- El agua dulce comienza a ser factor limitante

El azufre y su diversidad

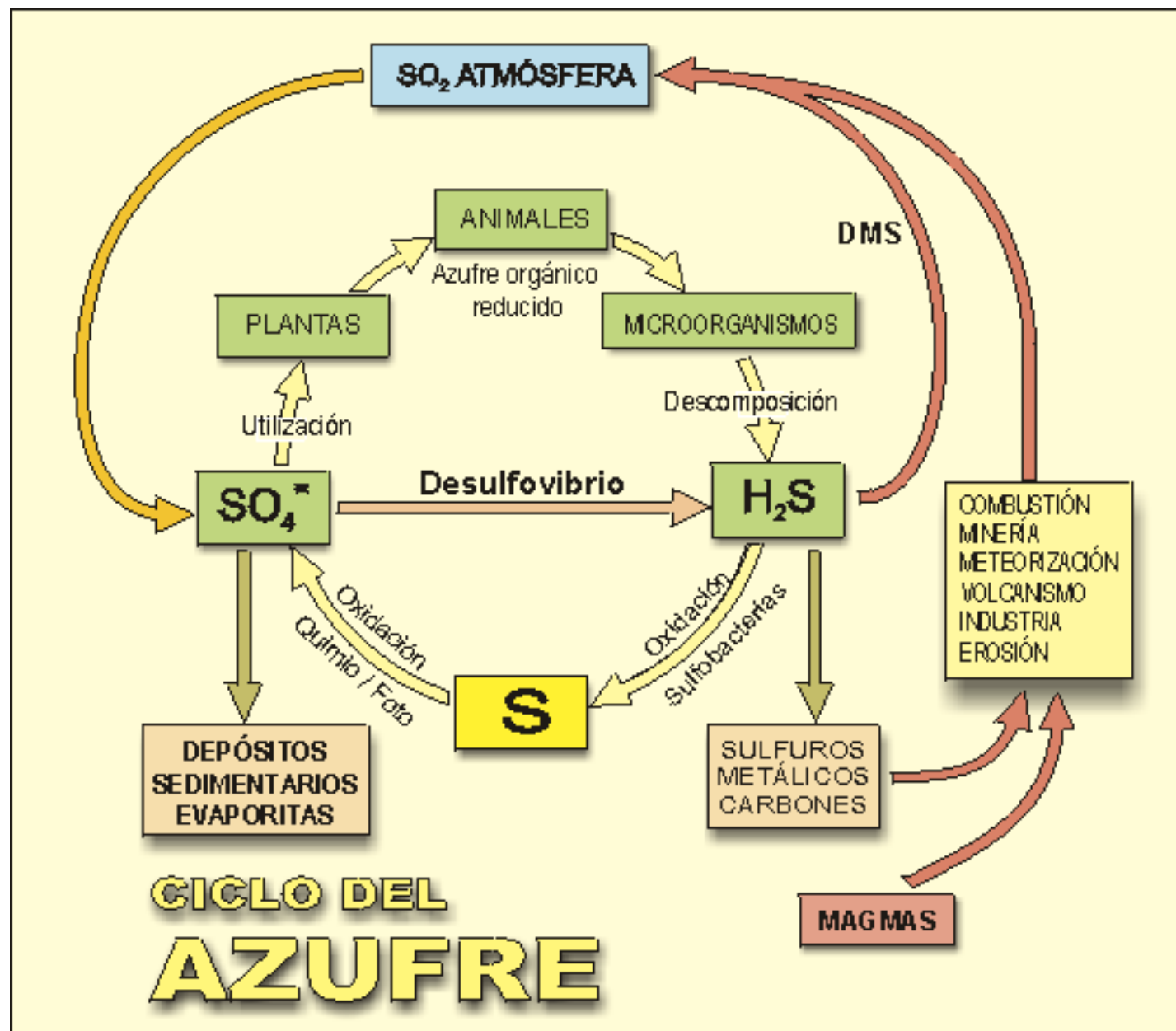
Forma	Especie ejemplo	Fórmula
S^{+6}	ácido sulfúrico anhídrido sulfúrico	H_2SO_4 SO_3
S^{+4}	ácido sulfuroso anhídrido sulfuroso	H_2SO_3 SO_2
S^{+2}	di cloruro de azufre	SCl_2
S^0	Azufre elemental (coloidal, flores, etc.)	S_8
S^{-2}	sulfuro de hidrógeno (ácido sulfhídrico) sulfhidrato de sodio sulfuros metálicos diversos	H_2S $NaHS$ M_xS_y etc.

Azufre: economía

- El ácido sulfúrico es un “sulfato de hidrógeno”, si se quiere ver así
- El valor económico está asociado a ser ácido fuerte y no al azufre
- Las especies más oxidadas (sulfato) tienen menor valor económico que las especies reducidas (bisulfito, sulfito, sulfuro)
- La oxidación ocurre espontáneamente, por ser un planeta con atmósfera oxidante
- La reducción requiere energía

Ciclo del azufre

- Se oxida en la atmósfera, en el mar y en la superficie del planeta
- Se reduce por acción biológica en ausencia de oxígeno (anaerobios) y en presencia de un agente reductor (lactato, hidrógeno)
- La reducción de sulfato ocurre en fangos y en el fondo marino
- La reducción ocurre en sistemas de cañerías



Ácido sulfhídrico

- La reducción de sulfato, sulfito, bisulfito y azufre elemental produce sulfuro, es decir, S^{-2}
- El sulfuro es muy reactivo con, por ejemplo, metales, pero también con orgánicos
- MS suelen ser insolubles
- Usualmente, en todo caso, aparece como sulfuro de hidrógeno, es decir, ácido sulfhídrico H_2S
- Habitualmente, también, se le usa comercialmente como sulfhidrato de sodio $NaHS$

Chile y el azufre

- Se puede estimar la extracción de azufre de la litosfera y observar que Chile incorpora el 40% del azufre litosférico a la biósfera
- Chile ocupa un 1,6% de la superficie continental del planeta
- La cantidad de azufre chileno debe abrir oportunidades pero implica serías responsabilidades

Se purifica cobre de lo “demás”

- Lo “demás” en el minera produce:
 - Ganga (estériles, relaves)
 - azufre en diversas formas (sulfato en aguas de relave; anhídrido sulfuroso en gases que se llevan a ácido sulfúrico, en lo principal)
 - escoria de hierro
 - arsénico y otros metales y metaloides
- Usando agua y energía

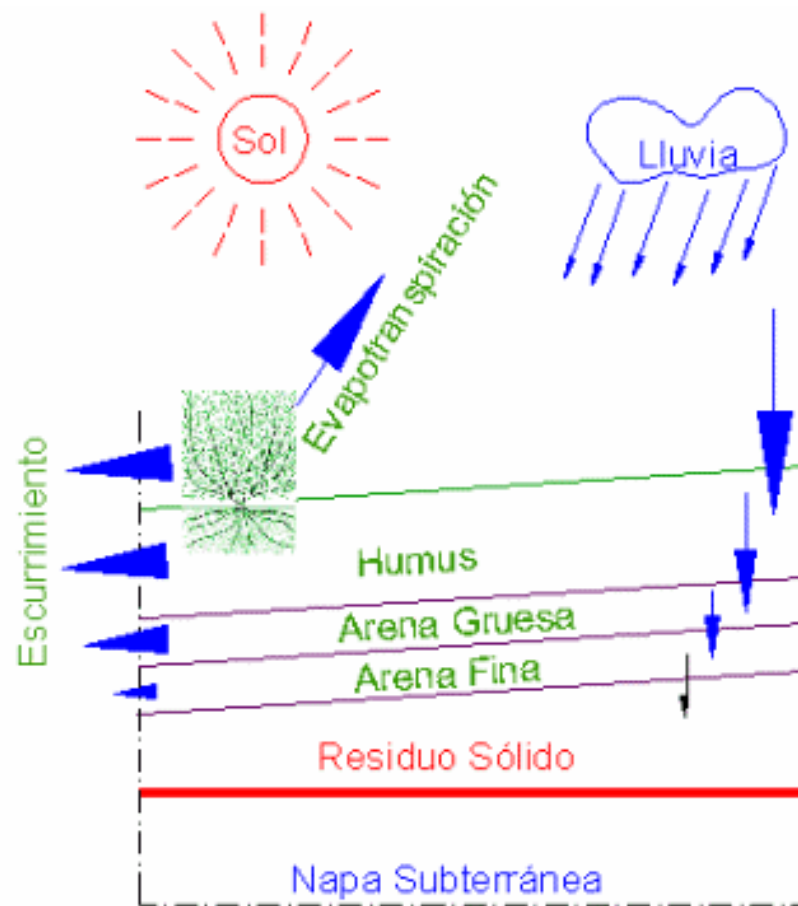
Impacto de la ganga

- La ganga tiene poco cobre, al igual que los relaves
- El poco cobre que tiene aparece disuelto en fase líquida como sulfato de cobre (si llueve...)
- La gran producción de ácido puede servir para lixiviar gangas, para neutralizar ambientalmente esos sólidos
- Esta lixiviación es una operación más gentil que la fundición (hidrometalurgia)

Sólidos abandonados

- Al abandonar un tranque de relaves, es necesario impedir la evolución de “aguas azules” (CuSO_4) futuras, sea como escorrentías o, peor aun, a las napas de agua subterránea
- Un esquema muy recurrente utiliza la creación de un ecosistema vegetal que evite la incorporación de aguas al sólido potencialmente generador de aguas azules

Forestación



¿Qué impacto
tiene esta
pasivación en el
ACV del COBRE?

¿Es posible la
Prevención de la
contaminación en
minería?

Figura 2: Diagrama ilustrativo de forestación de tranques antiguos

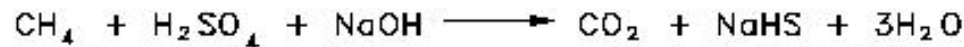
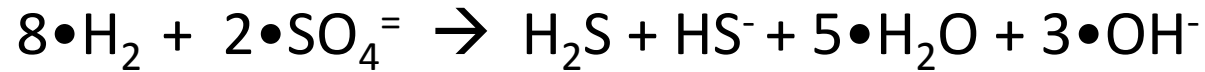
El problema de los sólidos

- Los sólidos que se abandonan contienen especies lixiviables que estaban en la litósfera y que quedan luego en la biósfera
- Los sólidos deben ser asilados del medio ambiente y luego desarrollar biomasa forestal
- Sin sello, la biomasa podría movilizar biológicamente y bioacumular metales tóxicos hacia niveles tróficos superiores (nosotros!!!)

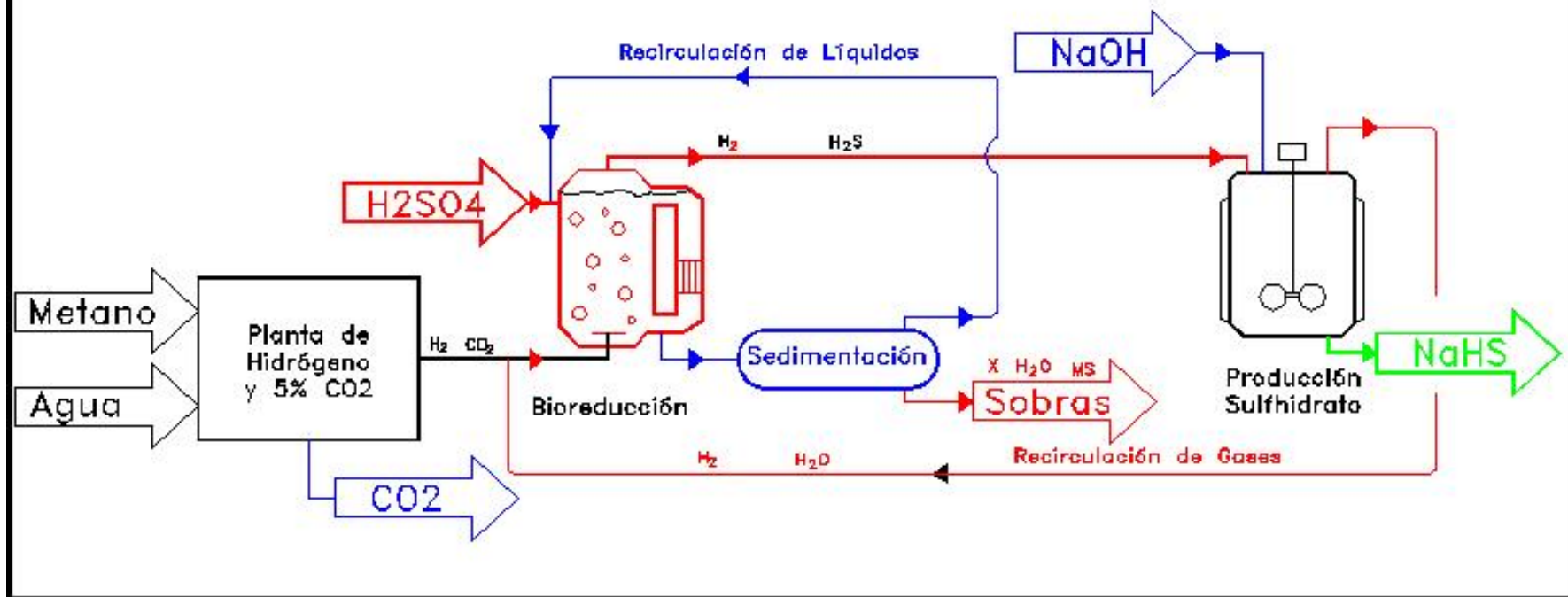
El problema de los líquidos

- Los líquidos descartados por la minería contienen muchísimas especies , pero pocas de ellas llegan a un nivel contaminante
- Problema más agudo: sulfato, molibdeno disuelto, arsénico disuelto
- Soluciones asociadas a osmosis reversa son un tanto costosas
- Soluciones de tipo bacteriano están en desarrollo

Reducción de sulfato industrial



El crecimiento celular consume un 5% (molar) del CO_2

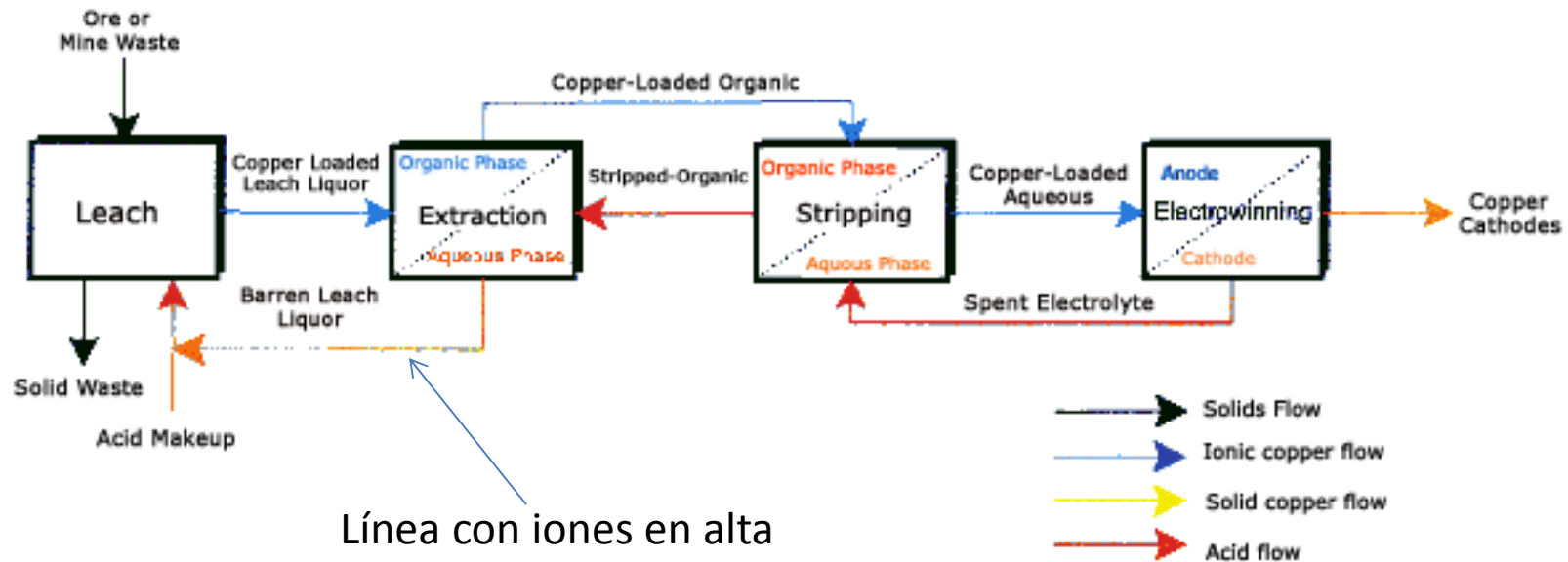


Aguas cargadas de cationes

- Cuando la minería se basa en lixiviación, se usa una solución ácida para lixiviar el cobre (y muchas otras especies)
- La solución lixivante se procesa de modo de retirar el cobre
- Se concentran entonces las otras especies
- La concentración llega a un punto en que no se puede operar por exceso de iones

Lix + SX + EW DFP

Simplified Flow Chart Leach - Solvent Extraction - Electrowinning Process



Línea con iones en alta concentración

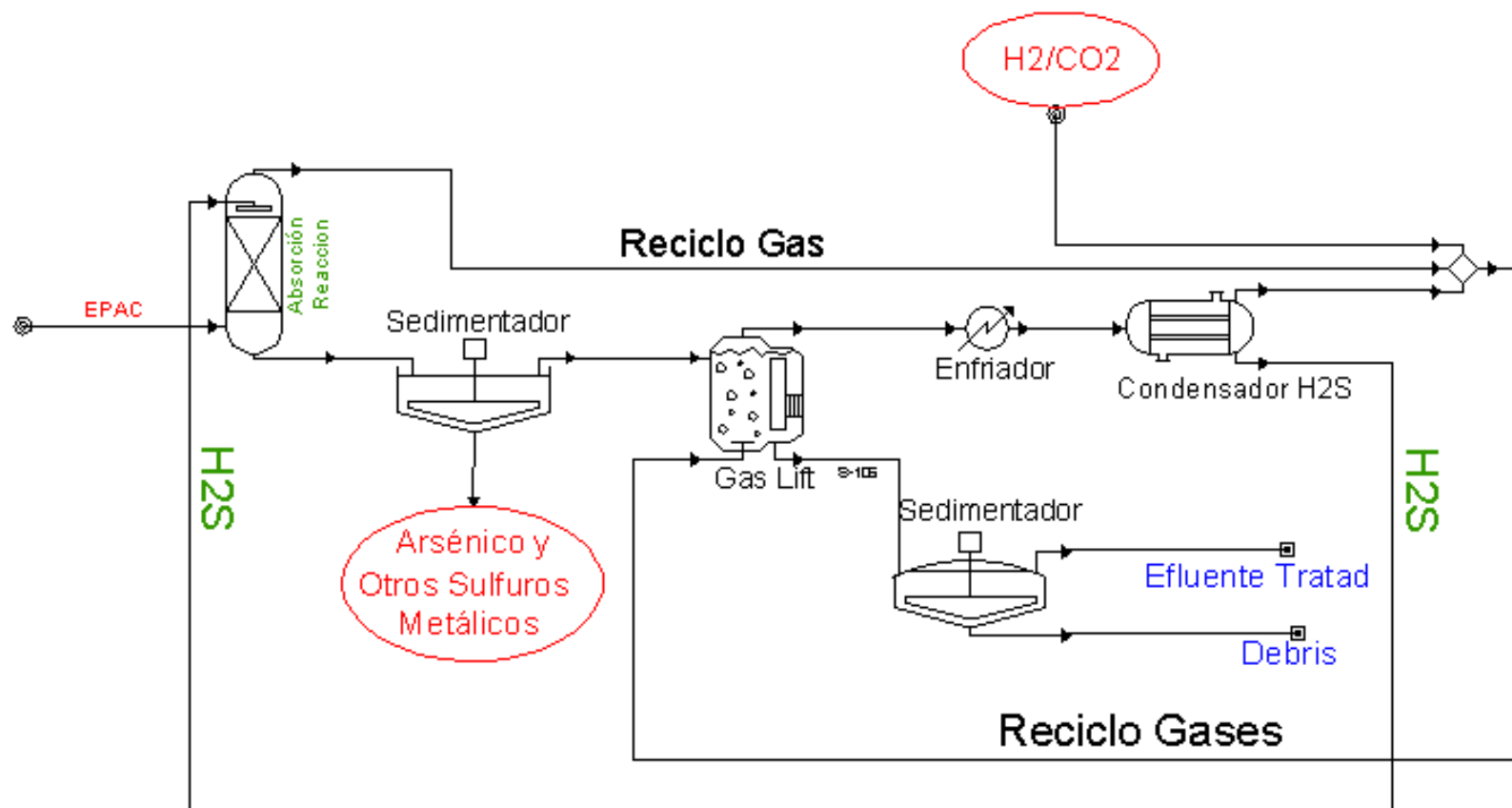
La línea efluente de Planta de Ácido

- Similarmente, al lavar gases de fundición, para limpiar los anhídridos de azufre para producir ácido sulfúrico, se obtiene una línea con el “todo lo demás” de los gases
- La LEPA tiene muy altas concentraciones de metales y metaloides arrastrados por los gases de fundición (alta velocidad y alta temperatura)

iones acuosos

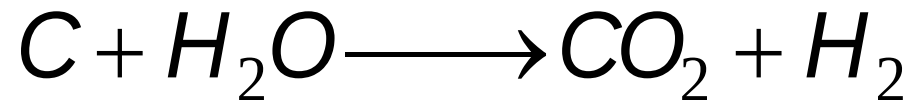
- Es de la mayor importancia limpiar las aguas de la línea de recirculación de la lixiviación
- Es ambientalmente fundamental capturar los iones de la LEPA
- En ambos casos, buscar formas químicas estables, que no continúen produciendo contaminantes en fase acuosa
- Probablemente, residuos peligrosos, pero controlados

Unir azufre y metales de nuevo



Pero... ¿H₂?

- Calentar carbón (800-900 °C)
- Inyectar vapor de agua

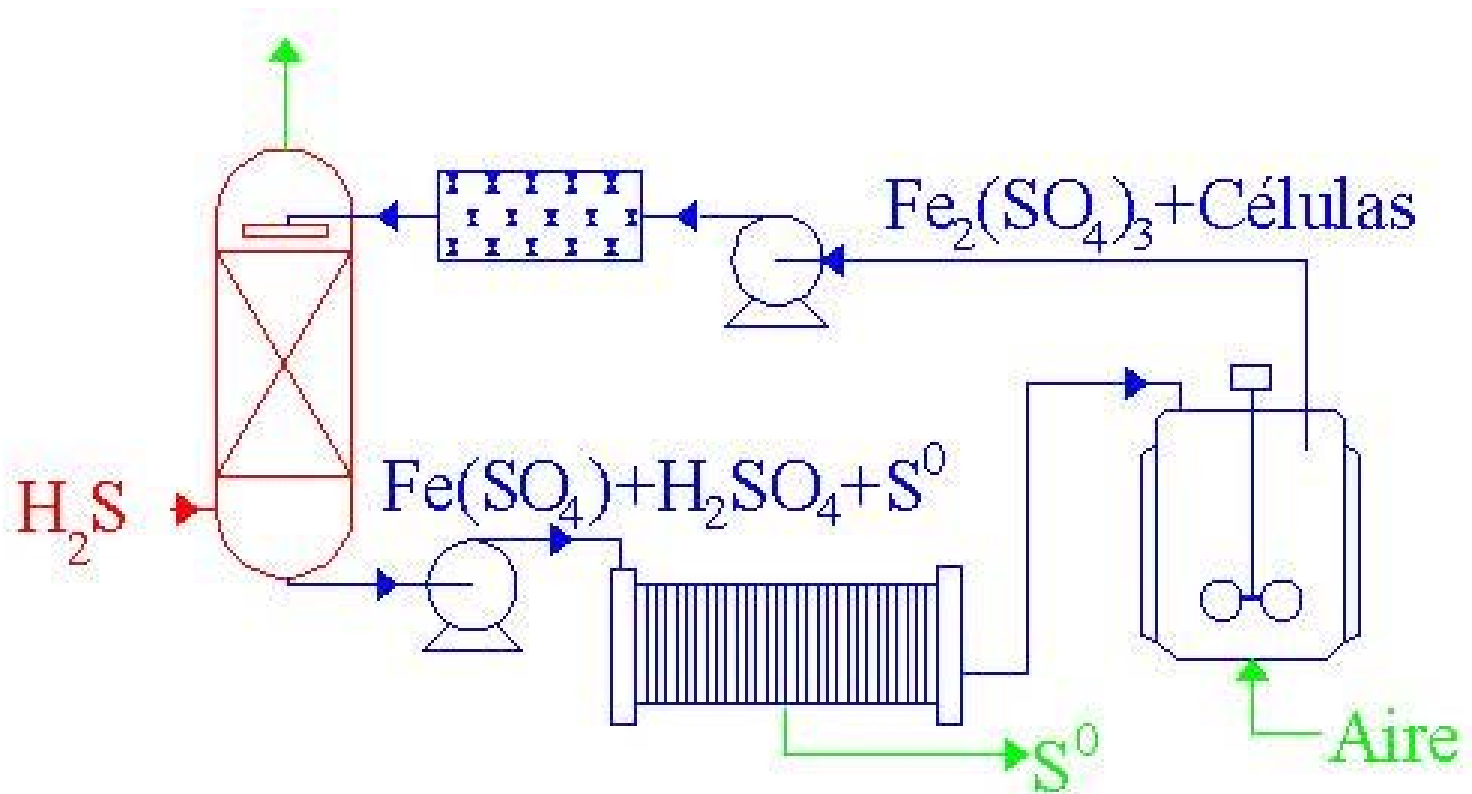


- En endotérmica (algo del carbón se usará para proveer el calor de reacción)
- La reacción water shift es muy conocida y usada
- Misma cosa con Metano, por reformación

El ácido sulfhídrico

- El H_2S es un gas sumamente tóxico
- Se le lleva a NaHS a fin de poder transportarlo
- Chile importa NaHS en cantidades importantes
- Si tenemos H_2S sobrante, se le debe llevar a una fase ambientalmente estable
- Una oxidación del sulfuro en el sulfhídrico lo puede llevar a azufre elemental
- Proceso híbrido químico y biotecnológico

Azufre elemental



El estado de oxidación 0 (elemental) es más estable

Desafíos

- Chile debe:
 - Controlar el arsénico que extrae de la litósfera
 - Mitigar la carga de sulfato en fase acuosa
 - Producir bienes futuros a partir de los residuos del pasado y del presente
 - Manejar la intensidad energética de la minería
 - Cuidar el juicioso uso del agua dulce, mejorando los circuitos de recirculación

Reacciones inmediatas

- Temas actuales de Desarrollo Nacional:
 - recuperación de agua de procesos
 - control de la producción de especies inestables de arsénico
 - tecnologías de captura de iones en solución acuosa, por medios químicos o físicos
 - capturar la energía sobrante de la minería y subirla al sistema interconectado

Gracias por la atención

Leandro Herrera, Ph.D